基于 DBF-SCORE 的 Ka SAR-GMTI 信号处理方法研究*

王明辉[1,2] 王 辉[1] 赵凤军[1]
(1. 中国科学院电子学研究所 北京 100190;2. 中国科学院大学 北京 100039)

摘 要:在 SAR 信号处理中为增大接收增益,提高系统回波的信噪比,可利用数字波束形成(DBF)技术(扫描接收技术)生成灵活控制的高增益窄波用于多通道接收、处理回波信号。分析并推导了距离向多通道的回波信号,然后详细分析了基于偏置相位中心天线(DPCA)的 SAR-GMTI 处理方法。在此基础上给出了一种使用 DPCA 杂波抑制技术处理基于时变加权 DBF-SCORE 回波的 Ka SAR-GMTI 处理方法,并给出了系统实现原理。与其他 SAR-GMTI 处理方法相比较,使用 DBF 技术可以提升系统信噪比,有助于改善杂波抑制性能。通过仿真,验证了用 DPCA 技术处理基于 DBF 动目标回波的有效性。

关键词:毫米波合成孔径雷达;数字波束形成(DBF-SCORE);地面运动目标指示(GMTI);偏置相位中心天线(DPCA)
中图分类号: TN957.51 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**: 510.810

Algorithm of Ka SAR-GMTI based on DBF-SCORE

Wang Minghui[1,2] Wang Hui[1] Zhao Fengjun[1]
(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: To increase the receive gain and signal-to-noise ratio (SNR) in the SAR signal processing, the technique of digital beam forming (DBF) (scan-on-receive, SCORE) can be employed to receive and process echo signal by forming a high gain and sharp beam pattern to receive the pulse echoes. In this paper, the echo signal of each channel on elevation is analyzed firstly, and the method of SAR-GMTI processing is given and analyzed. On this basis of SAR-GMTI, this paper presents an algorithm of Ka SAR-GMTI using DPCA clutter suppression technique to process echoes based on the time-variant weighting DBF-SCORE and further presents the block diagram of system realization. Compared with other SAR-GMTI processing methods, using DBF technique can enhance the system SNR and improve the performance of suppressing clutter. Finally, moving target simulation results validate that using DPCA to process moving target echoes based on DBF is as same as the common echoes, that is, prove its effectiveness of the proposed method.

Keywords: Ka synthetic aperture radar (Ka SAR); digital beam-forming scan-on-receive (DBF-SCORE); ground moving target indication (GMTI); displaced phase center antenna (DPCA)

1 引 言

近年来 SAR 在军用和民用领域均起到了重大的作用,而 SAR-GMTI 所提供的战场情报信息是其他传感手段提供的信息所无法比拟的,它提供的 SAR 图像可以实时更新的地面目标的运动状态,此对于分析敌方的军事行动意图,并适时有效地调整我方作战方案具有重大意义。而 SAR-GMTI 在机载战场侦察和星载广域战略与战术侦察、监视和对运动目标的检测、跟踪的能力,也促使 SAR-GMTI 技术得到不断地研究和发展[1-3]。

Ka 波段拥有短波长的特点,这个特性使其能具有非常高的绝对带宽,同时使得 Ka 波段能够达到相当高的距离向分辨率。且其设计出来的天线尺寸体积小、重量轻。特别是对于 Ka 波段的干涉 SAR 而言,其干涉天线长度减

收稿日期:2016-02
* 基金项目:总装预研基金项目(9140A21030114ZK13)、高分对地观测重大专项(GFZX04011901) 资助

小，以至于能嵌入到单个平台上[4-6]。

而对于 Ka SAR 系统，其系统损耗比较大，需要采用数字波束形成（digital beam forming，DBF）[7-9]技术（扫描接收技术，scan-on-receive，SCORE）[10-11]来提升系统信噪比：1）对各通道数据进行时变加权后叠，该方法在回波接收期间，能够始终将数字接收波束的波束中心对准脉冲中心所在位置，从而增大接收增益；2）对距离向各通道的数据先进行距离压缩处理，而后针对于每个距离门，各通道的数据进行相位加权后累加[12]。因为这可以减小接收波束的宽度，以使其能更有效地接收到地面回波。

到目前为止，还未见使用 DPCA 杂波抑制技术处理基于 DBF 动目标回波的相关文献，本文则采用在 Ka 波段天线设计，初步考虑发射和接收天线分置，使用 DBF-SCORE 技术构建雷达回波模型，并采用 RD 算法对 SAR 图像成像，采用 DPCA 杂波抑制算法进行动目标检测与定位，完成了基于 DBF-SCORE 的 Ka SAR-GMTI 信号处理方法的研究。

2 DBF-SCORE 的接收信号模型

2.1 几何模型分析

本节采用有源相控阵天线，采用单发多收的工作模式，并使收发天线方向图主瓣覆盖整个测绘带，使用中间孔径发射，接收时各孔径单独接收，如图 1 所示。

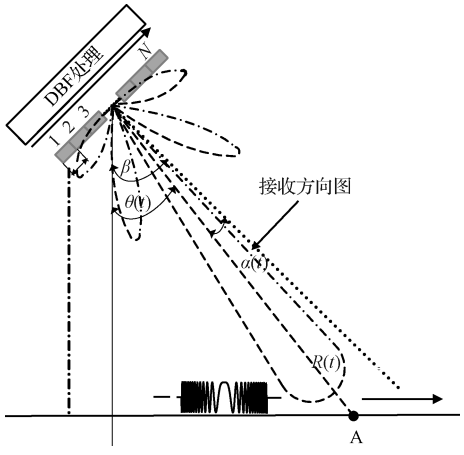


图 1 距离向发射和接收几何模型

以点目标为例来分析其原始回波信号模型，假设接收天线在距离向上有 N 个孔径，相应有通道，距离向子孔径间距为 d，天线的法线与竖直方向夹角为 β，接收波束中心与天线法向的夹角为 $\alpha(t)$，回波视角为 $\theta(t)$，且 $\alpha(t)=\theta(t)-\beta$。令 $\theta_0=\theta(t_0)$，$\alpha_0=\alpha(t_0)$。波束法线指向测绘带内的点目标 $A(x_0,R_t)$，其对应的最短斜距为 R_t，则各通道的接收回波如式(1)所示：

$$s_n(t)=\gamma\cdot rect[(t-t_n)/T_p]\cdot\exp(j2\pi f_c(t-t_n))\cdot\exp(j\pi K_r(t-t_n)^2) \quad (1)$$

式中：γ 表示与后向散射和入射角有关的复常数，f_c 为载频，K_r 为调频率，T_p 为发射脉宽。

而 $t_n=\dfrac{2R_n}{c}=t_0-\dfrac{d_n\sin\alpha_0}{c}$ 为脉冲发射后，经过点 A 反射回参考孔径所需要的时间，$t_0=\dfrac{2R_0}{c}$ 为发射天线相位中心到目标的往返时间，R_n 为斜距，c 为光速。

利用相移函数 $\exp(j2\pi f_c t)$ 对各通道进行下变频后，通道 n 的信号表达式变为：

$$s'_n(t)=rect[(t-t_n)/T_p]\cdot\exp(-j2\pi f_c t_n)\cdot\exp(j\pi K_r(t-t_n)^2) \quad (2)$$

2.2 DBF 时域加权处理

通过数字波束形成（DBF）技术对不同通道间的数据相干累加可形成成高增益窄波束。通过实时变动合成时各通道的加权权值而调整波束指向，使得接收波束中心时刻指向脉冲中心，实现高增益接收，提高灵敏度。距离向 DBF 接收的一般模型如图 2 所示。

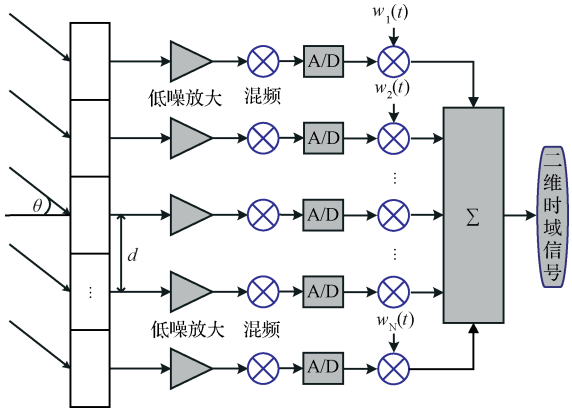


图 2 距离向接收 DBF 处理一般模型

在 n 时刻，波束指向 $a(t)$，根据经典波束形成理论，为满足波束中心指向脉冲中心的条件，则第 n 个通道的时变加权系数 $w_n(t)$ 为：

$$w_n(t)=\exp\{-j2\pi d_n\sin(\alpha(t))/\lambda\} \quad (3)$$

式中：$d_n=(n-(N-1)/2)\cdot d$ 为第 n 个孔径与参考位置的间距，$n=1,\cdots,N$。

对每个孔径经过式(3)加权处理后，第 n 个通道的信号变为：

$$s''_n(t)=\gamma\cdot\exp(-j2\pi f_c t_n)\cdot rect[(t-t_n)/T_p]\cdot\exp(j\pi K_r(t-t_n)^2)\cdot\exp(j2\pi/\lambda\cdot d_n\cdot(\sin\alpha_0-\sin\alpha_t)) \quad (4)$$

式中：$\alpha_0=\alpha(t_0)=\theta_0-\beta$，由于测绘带内任意位置处的发现偏移角通常在 $\pm5°$ 之内，因此测绘带中满足 $\sin\alpha(t)\approx\theta\approx\alpha(t_0)+\alpha'(t_0)(t-t_0)$，带入式(5)中得：

$$s'''_n(t)\approx\gamma\cdot\exp(-j2\pi f_c t_n)\cdot rect[(t-t_n)/T_p]\cdot\exp(j\pi K_r(t-t_n)^2)\cdot\exp(-j2\pi/\lambda\cdot d_n\cdot\alpha'(t_0)(t-t_0)) \quad (5)$$

3 基于 DPCA 的 SAR 杂波抑制处理算法

3.1 DPCA 杂波抑制原理

在机载、星载雷达中，偏执相位中心天线（DPCA）技术沿航迹搭载两副天线，天线相位中心移动一定距离，使天线相位中心在连续发射的脉冲时间里相对于地面静止不动，从而补偿平台运动带来的多普勒展宽，使得地杂波多普勒频谱带宽变窄，进而采用两脉冲相消就可抑制杂波[13-16]，其原理示意如图 3 所示。

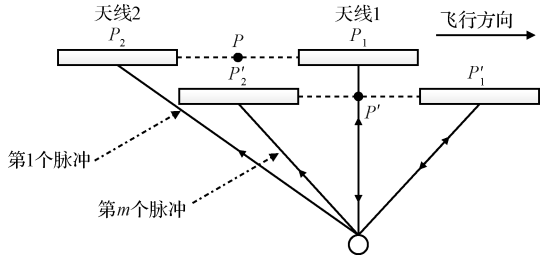


图 3 DPCA 原理示意

两天线 Q_1 和 Q_2 沿航迹放置，它们的相位中心相距 L，飞行速度为 V_a，雷达脉冲重复频率为 prf，箭头所指为平台飞行方向，天线 Q_1 发射脉冲，两天线 Q_1 和 Q_2 同时接收脉冲，接收第 1 个回波脉冲时，天线 1 的接收相位中心在 P_1 点，天线 2 的接收相位中心在 P 点，如果满足条件：

$$d = 2mV_aT = 2mV/prf \tag{6}$$

则当发射 m 个脉冲后，天线 1 的接收相位中心移到 P'_1 处，天线 2 的接收相位中心移到 P' 处，P_1 和 P' 位置处于相同的方位位置，所以此时天线 1 收到的第一个回波与天线 2 收到的第 m 个回波包含相同的地杂波信息，且由于运动目标自身运动而产生了额外的信息，将两路回波信号相减，即可以抑制地杂波[14-16]。

3.2 复图像域 DPCA 检测原理

采用复图像域 DPCA 方法进行目标检测时，由于通道失配、平台偏航、配准校准误差等多种因素的存在，使得杂波抑制性能下降，因此需要对回波信号做平台运动补偿并且做聚焦处理，如图 4 所示。理想情况下，对于同一距离向分辨单元不同方位位置的地物，两通道回波数据分别进行 SAR 成像处理后得复图像 $S_1(t)$、$S_2(t)$，杂波对消特性如式(7)所示[17-21]。

$$S(t) = |S_1(t) - S_2(t)| = 2k'T_s\left|\mathrm{sinc}\left(\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{V_a^2(t-\tau)}{R_c}v_r\right)+T_s\right)\right| \cdot \left|\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}V_r\Delta\tau\right)\right| \tag{7}$$

式中：λ 是波长，k' 是和目标后向散射系数有关的常数，τ 与目标方位向位置和 V_a 有关，T_s 是合成孔径时间。当目标为静止目标时，即 $V_r = 0$ 静止杂波被完全对消。

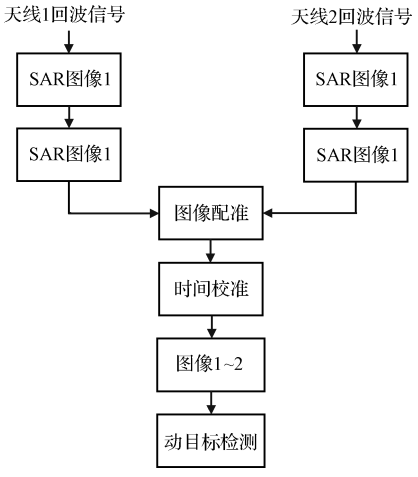


图 4 复图像 DPCA 检测流程

4 DBF-SCORE Ka SAR-GMTI 算法流程

综合前文，本节给出 3 孔径 DBF-SCORE Ka SAR-GMTI 算法处理流程，如图 5 所示。

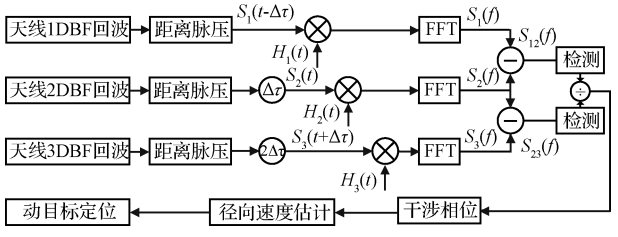


图 5 DBF-SCORE SAR-GMTIA 算法流程

3 孔径的信号回波距离分别为：

$$\begin{aligned} R_{n1} &= \mathrm{sqrt}(R_c^2 + l_n^2 - 2R_{c1} \cdot l_n \cdot \sin(\theta_0 - \beta)) \\ R_n &= \mathrm{sqrt}(R_c^2 + l_n^2 - 2R_c \cdot l_n \cdot \sin(\theta_0 - \beta)) \\ R_{n2} &= \mathrm{sqrt}(R_c^2 + l_n^2 - 2R_{c2} \cdot l_n \cdot \sin(\theta_0 - \beta)) \end{aligned} \tag{8}$$

式中：R_{c1}、R_c、R_{c2} 为 $t = 0$ 时 3 天线距离目标的斜距。

而 $l_n = n \cdot d/N$，则可得回波时间为：

$$\begin{aligned} t_{n1} &= \frac{(R_c + R_{n1})}{c} \\ t_{n2} &= \frac{(R_c + R_n)}{c} \\ t_{n3} &= \frac{(R_c + R_{n2})}{c} \end{aligned} \tag{9}$$

将其代入式(5)可得 3 个孔径中通道 n 的信号表达式：

$$\begin{aligned} o_{1,n}(t) &\approx \gamma \cdot \exp(-\mathrm{j}2\pi f_c t_{n1}) \cdot rect[(t - t_{n1})/T_p] \cdot \exp(\mathrm{j}\pi K_r(t - t_{n1})^2) \cdot \exp(-\mathrm{j}2\pi/\lambda \cdot d_n \cdot \alpha'(t_0)(t - t_0)) \\ o_{2,n}(t) &\approx \gamma \cdot \exp(-\mathrm{j}2\pi f_c t_{n2}) \cdot rect[(t - t_{n2})/T_p] \cdot \exp(\mathrm{j}\pi K_r(t - t_{n2})^2) \cdot \exp(-\mathrm{j}2\pi/\lambda \cdot d_n \cdot \alpha'(t_0)(t - t_0)) \\ o_{3,n}(t) &\approx \gamma \cdot \exp(-\mathrm{j}2\pi f_c t_{n3}) \cdot rect[(t - t_{n3})/T_p] \cdot \exp(\mathrm{j}\pi K_r(t - t_{n3})^2) \cdot \exp(-\mathrm{j}2\pi/\lambda \cdot d_n \cdot \alpha'(t_0)(t - t_0)) \end{aligned} \tag{10}$$

由此对每个孔径中各个通道的信号叠加可得各天线的回波信号。

在对每两路信号进行DPCA处理时，需要对各路信号进行相位补偿，除去由于天线水平排列产生的相位偏差，同时消去由载机形成的线性调频项，补偿的参考函数选取如式(11)所示：

$$H_1(t)=\exp\left\{\mathrm{j}\frac{\pi L^2}{\lambda R_c}\right\}\exp\left\{\mathrm{j}\pi\frac{2V_a^2}{\lambda R_c}(t-\Delta\tau)^2\right\}\cdot \exp\left\{\mathrm{j}\pi\frac{V_aL}{\lambda R_c}(t-\Delta\tau)\right\}$$

$$H_2(t)=\exp\left\{\mathrm{j}\pi\frac{2V_a^2}{\lambda R_c}t^2\right\}$$

$$H_3(t)=\exp\left\{\mathrm{j}\frac{\pi L^2}{\lambda R_c}\right\}\exp\left\{\mathrm{j}\pi\frac{2V_a^2}{\lambda R_c}(t+\Delta\tau)^2\right\}\cdot \exp\left\{\mathrm{j}\pi\frac{V_aL}{\lambda R_c}(t+\Delta\tau)\right\} \tag{11}$$

在检出动目标后，取出杂波相消后的两路图像的干涉相位 $\Phi_1(f)$、$\Phi_2(f)$ 并相减，就可求出目标的真实方位位置，即：

$$\Delta\varphi=\Phi_1(f)-\Phi_1(f)=(2\pi/\lambda)\cdot(L/V_a)\cdot V_y \tag{12}$$

则估计的径向速度为：

$$\hat{V}_y=\lambda V_a\cdot\Delta\varphi/(2\pi L) \tag{13}$$

由检测到的目标位置与方位向偏移量以及目标真实位置之间的关系，可得目标的定位位置：

$$\hat{x}_0=R_c\cdot(\hat{V}_y/V_a)+[(\lambda R_c)/(2V_a)\hat{f}] \tag{14}$$

5　仿真分析

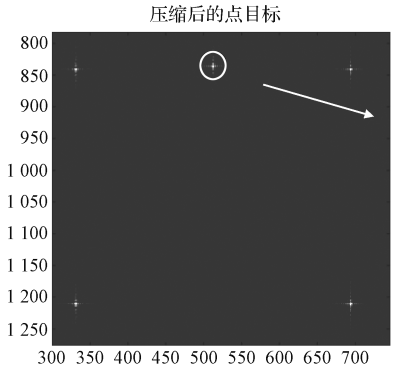
为验证本文提出的基于DBF-SCORE Ka SAR-GMTI信号处理方法，本节给出了仿真结果，并对其进行分析。仿真参数如表1所示。

表1　仿真参数

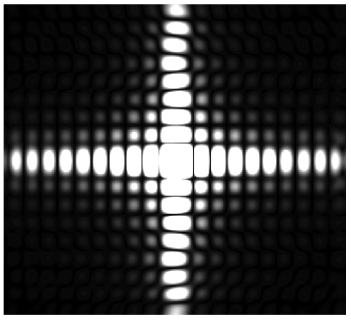
参数	数值
载频	35.75 GHz
平台高度	3 km
速度	150 m/s
发射脉冲	70 MHz
PRF	1 500 Hz
视角	72.9°～74.48°

场景中心斜距为10 km，将一个运动目标置于场景中央，4个静止目标分别在周围，地面速度 $V_{y\text{-round}}=0.1$ m/s，如图6(a)所示为经过二维压缩聚焦后的成像场景图，并给出动目标的升采样图像，如图6(b)所示。

如图7所示为杂波对消前后的对比图，如图7(a)所示为地杂波抑制之前的幅度图，如图7(b)所示为地杂波抑制之后的幅度图。由图可知，DPCA能很好地抑制杂波，并同时保留动目标。计算对消前杂波复图像和对消后剩余杂波复图像的均值、方差，可得到地杂波的对消比约为25.4 dB。

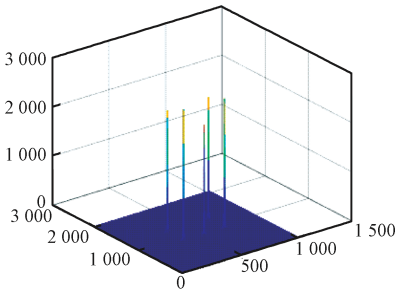


(a) 目标点设置

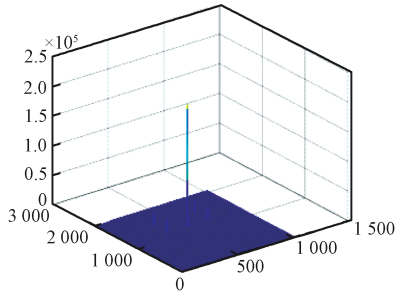


(b) 目标升采样图

图6　目标点设置及升采样



(a) 动目标杂波对消前



(b) 动目标杂波对消后

图7　动目标杂波对消前后对比

而利用普通方法来生成3通道SAR系统回波，并对回波做脉压处理和通道补偿，进而进行杂波对消，同样计算对消前杂波复图像和对消后剩余杂波复图像的均值、方差，可得地杂波的对消比约为6.22 dB，从而看出本方法将对消比提升约4倍，确实提高系统回波增益，改善系统信噪比。

如图8所示为经过CFAR检测后的结果图，如图8(a)所示为检测出动目标的二维图像，如图8(b)所示则为检测出动目标的三维图像。可以看出经过杂波抑制后，运动目标能够很好地被检测出来，且动目标径向速度估计为 $\hat{V}_y=-0.104\ 2$ m/s，定位位置为 $\hat{x}_0=-9.827$ m。

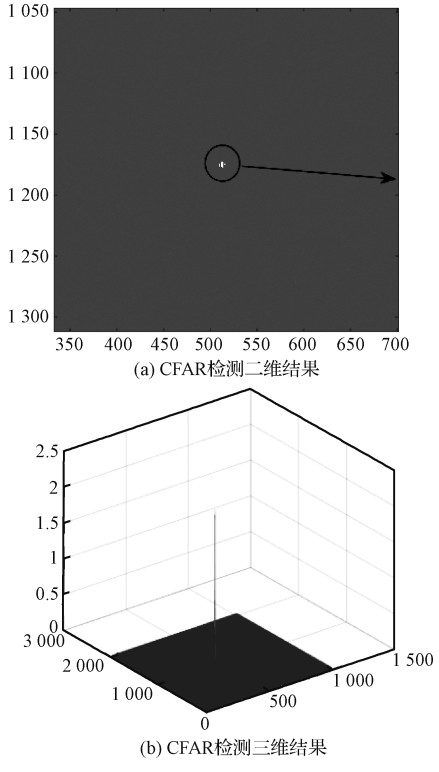


图8 CFAR二维、三维检测结果示意

6 结 论

为提高SAR的回波增益，改善系统信噪比，本文首先推导并分析了基于时变加权的DBF-SCORE的回波信号模型，然后分析了DPCA杂波抑制的原理及处理方法，在此基础上，给出了一种基于DBF-SCORE技术的Ka SAR-GMTI动目标检测、径向速度估计以及目标定位的处理方法。该方法验证了使用DPCA技术同样可用于处理基于DBF的动目标回波信号，且杂波抑制效果较普通回波效果有明显提高，并对地面慢速运动目标进行检测、测速及定位，通过计算机对算法进行了仿真验证，充分证明了该算法的有效性。

参 考 文 献

[1] CURLANDER J C, MCDONOUGHM R N. Synthetic aperture radar: System and signal processing[M]. John Wiley & Sons Inc, 1991.

[2] 杨垒. 多通道SAR-GMTI方法研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2009.

[3] 周辉，赵凤军，禹卫东. SAR运动目标微动信号模型及微多普勒效应研究[J]. 电子测量技术，2015，38(11)：135-142.

[4] 邢涛，胡庆荣，李军，等. 毫米波高分辨SAR成像算法性能分析[J]. 现代防御技术，2015，43(1)：81-86.

[5] 史洪印，赵欣悦. 基于CS的SAR旋转微动目标检测方法研究[J]. 仪器仪表学报，2015，36(6)：1342-1349.

[6] SUO ZH Y, LI ZH F, BAO ZH. Multi-channel SAR-GMTI method robust to coregistration error of SAR images [J]. IEEE Transaction on Aerospace & Electric Systems, 2010, 46(4): 2035-2043.

[7] WU SH Q. Development of digital array synthetic aperture radar[C]. Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar Proceedings, 2009: 2-5.

[8] YOUNIS M, HUBER S, PATYUCHENKO A, et al. Digital beam-forming for space-borne reflector- and planar-antenna SAR - a system performance comparison [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009: III-733-III-736.

[9] BORDONI F, YOUNIS M, VARONA E M, et al. Adaptive Scan-on-receive based on spatial spectral estimation for high-resolution wide-swath synthetic aperture radar[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009: I-64-I-67.

[10] SUESS M, ZUBLER M, ZAHN R. Performance investigation on high resolution wide swath SAR system[C]. Proceedings of EUSAR, 2002: 49-53.

[11] BORDONI F, YOUNIS M, MAKHAUL V, et al. Adaptive scan-on-receive based on spatial spectral estimation for high-resolution wide-swath SAR[C]. Proceedings of IGARSS, 2009: 431-435.

[12] VARONA E M. Adaptive digital beam-forming for high-resolution wide-swath SAR system [D]. De Catalunya: Universitat Politecnica, 2009.

[13] 保铮. 雷达成像技术[M]. 北京：电子工业出版社，2005：318-319.

[14] 郑明洁. 合成孔径雷达动目标检测和成像研究[D]. 中国科学院电子学研究所，2003：79-89.

[15] 张燕. 地面运动目标指示雷达空时自适应处理(STAP)算法研究[D]. 北京：中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心)，2010.

[16] 邬伯才，施晋生，孙龙，等. 宽带DBFSAR/MTI雷达典型工作模式设计[J]. 雷达科学与技术，2014(1)：20-28.

[17] 傅翀，雷斌，韩冰，等. 基于切比雪夫多项式的HRWS-SAR成像算法[J]. 国外电子测量技术，2015，34(8)：40-46.

(下转第46页)

机械工程学报,2011,16(1):177-181.
[4] 李佳,郑建明,李言,等.基于深孔钻削噪声信号的钻头磨损特征提取方法研究[J].西安理工大学学报,2011,27(4):446-450.
[5] 韩海舰,李文海.自适应噪声抵消系统的设计与性能仿真[J].电子测量技术,2015,38(9):82-85.
[6] 焦卫东,林树森.用噪声残差似然估计改进经验模态分解基信号去噪方法[J].仪器仪表学报,2014,35(12):2808-2816.
[7] 胡为,庄奕琪,包军林,等.红外探测器低频噪声长时间监测系统设计[J].电子测量与仪器学报,2015,29(2):265-271.
[8] 王莉,牛群峰,胡红生.便携式多功能噪声特性测试分析仪[J].仪表技术与传感器,2009(5):19-21.
[9] 于洪涛,余桐奎,王双记,等.主成分分析法在振动噪声源分析中的应用[J].测控技术,2009,28(5):78-81.
[10] 何志勇,朱忠奎,张茂青.基于小波包域噪声能量分布的脉冲噪声消除[J].仪器仪表学报,2011,32(9):2071-2078.
[11] CARNITI P, CASSINA L; GOTTI C. A technique for noise measurement optimization with spectrum analyzers [J]. Journal of Instrumentation,2015,10(8):1-12.
[12] 周涛,郭庆,徐翠锋.基于图像处理的麻花钻角度测量[J].国外电子测量技术,2014,33(6):37-40.
[13] 张伟,焦卫东,钱苏翔.一种多通道噪声与振动信号联合采集装置[J].仪表技术与传感器,2007(10):41-43.

作者简介

黄德福,1992 年出生,男,汉族,工学学士,主要研究方向为测控技术与仪器。

管芳(通讯作者),1985 年出生,女,汉族,工学硕士,主要研究方向为测控技术与仪器。

E-mail:phoehu@eyou.com

(上接第 41 页)

[18] 王肖洋,高贵,周石琳,等. 一种基于双通道 DPCA 的 SAR GMTI 杂波抑制方法[J]. 雷达学报, 2014(2):241-248.
[19] 刘尧,王辉,禹卫东. 星载 Ka-SAR 俯仰向自适应 DBF 算法研究[J].信号处理,2015(7):808-814.
[20] 李智勇,余小萍,姜真,等. 基于蛙眼检测模型的双阈值判定目标跟踪方法[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(2):187-195.
[21] 张国刚,徐向辉. 基于加权纹理特征的 SAR 图像目标识别算法[J]. 国外电子测量技术,2015,34(9):22-25.

作者简介

王明辉(通讯作者),1991 年出生,本科毕业于北京信息科技大学,现硕士在读,就读于中国科学院电子学研究所通信与信息系统专业,主要研究方向为毫米波 SAR 动目标检测与成像。

E-mail:wangminghui3163@163.com

王辉,1972 年出生,工学博士,现工作于中国科学院电子学研究所,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为毫米波合成孔径雷达信号处理技术。

E-mail: wanghui@mail.ie.ac.cn

赵凤军,1963 年出生,工学博士,现工作于中国科学院电子学研究所,研究员,博士生导师,主要研究方向为合成孔径雷达微波技术。

E-mail: fjzhao@mail.ie.ac.cn